

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

С. Д. СРАПЯН, С. М. ДУРГАРЬЯН, Л. С. ОГАНИСЯН

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО
 НЕКОНТАКТНОГО РАСХОДОМЕРА С СОВМЕЩЕННЫМ
 НАГРЕВАТЕЛЕМ И ТЕРМОПРИЕМНИКАМИ

При изготовлении полупроводниковых приборов возникает необходимость в измерении с высокой точностью весьма малых расходов газопереносителей (азота, аргона или кислорода). Для этой цели широко используются калориметрические неконтактные расходомеры [1, 2]. Однако они по своим техническим характеристикам не полностью удовлетворяют требованиям, которые диктуются технологией изготовления полупроводниковых приборов. Всем этим предъявляемым требованиям более полно удовлетворяет рассматриваемый калориметрический расходомер ДРГ-300 [3] с совмещенным нагревателем и термоприемниками с капиллярно-винтовым каналом. Расходомер ДРГ-300 (рис.) представ-

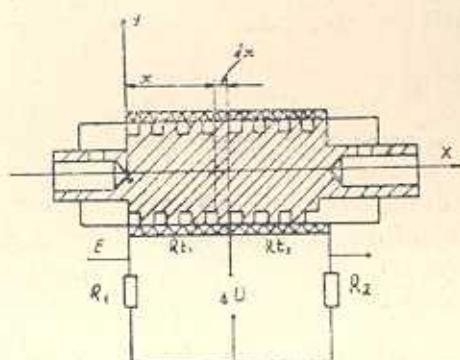


Рис.

ляет собой тонкую трубку из кварцевого стекла, снабженную обмоткой из платиновой проволоки, внутри которой помещен шнек, изготовленный из нержавеющей стали или фторопласта. При прохождении газа в результате неодинакового охлаждения платиновых обмоток произойдет разбаланс электроизмерительного моста, величина которого будет зависеть от измеряемого расхода газа.

В [1] приводится тепловой расчет расходомера без учета теплопроводности трубки. В [4] рассматривается задача без учета потери тепла в окружающую среду, поэтому результаты, полученные по [1] и [4], не согласуются с экспериментальными данными.

В настоящей работе решается задача теплопроводности с учетом всех основных компонентов, входящих в тепловой баланс, что позволяет получить хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. При решении задачи предполагается, что торцы преобразователя тепло-

изолированы, а физические параметры протекающего газа (удельный вес, теплоемкость, теплопроводность и вязкость) постоянны и имеют значения, соответствующие средней температуре среды.

Для мощности, выделяемой в единице объема преобразователя, имеем:

$$P = I_n^2 R_0 (1 + \beta \theta_{cr}), \quad (1)$$

где I_n — ток, проходящий по термодатчикам; R_0 — сопротивление термодатчика при 0°C ; θ_{cr} — превышение температуры стенки в рассматриваемом сечении над температурой измеряемой среды; β — температурный коэффициент термодатчика.

Сформулируем условие теплового баланса для элемента dx трубки. Подаваемое за время dt количества тепла dQ_s равно сумме отведенного из элемента количества тепла за счет теплопроводности стенки трубки dQ_x , теплоотдачи в протекающий газ dQ_g и в окружающую среду dQ_{σ} :

$$dQ_s = dQ_x + dQ_g + dQ_{\sigma}. \quad (2)$$

Уравнение теплового баланса (2) с учетом (1) запишется в виде:

$$\frac{d\theta_r^3}{dx^3} + a_1 \frac{d^2\theta_r}{dx^2} + a_2 \frac{d\theta_r}{dx} + a_3 \theta_r = -\frac{a_4}{\beta_1}, \quad (3)$$

где

$$a_1 = \frac{\alpha \Pi_k}{cV}; \quad a_2 = \frac{I_n^2 R_0 + \alpha_0 \Pi_r - \alpha \Pi_k}{I_n^2 R_0 S};$$

$$a_3 = \frac{\alpha \Pi_k}{\lambda_{ct} S c V} (I_n^2 R_0 S \beta - \alpha_0 \Pi_r); \quad \beta_1 = \frac{I_n^2 R_0 S \beta - \alpha_0 \Pi_r}{I_n^2 R_0 S};$$

α — коэффициент вынужденной конвекции; α_0 — коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции; λ_{ct} — коэффициент теплопроводности трубки; S — сечение трубки; θ_r — превышение температуры измеряемой среды в рассматриваемом сечении над ее температурой при входе в канал; Π_k — эффективный периметр канала; Π_r — периметр трубки; V — объемный расход измеряемого газа; c — удельная объемная теплоемкость измеряемой среды.

Из (3) получаем характеристическое уравнение

$$k^3 + a_1 k^2 + a_2 k + a_3 = 0.$$

В случае действительных корней характеристического уравнения общее решение уравнения (3) будет иметь вид

$$\theta_r = C_1 e^{k_1 x} + C_2 e^{k_2 x} + C_3 e^{k_3 x} - \frac{1}{\beta_1}. \quad (4)$$

где k_1, k_2, k_3 — корни характеристического уравнения; C_1, C_2, C_3 — постоянные интегрирования.

В случае, когда два корня характеристического уравнения комплексные, общее решение уравнения (3) будет иметь вид

$$\Theta_r = C_1 e^{k_1 x} + C_2 e^{\mu x} \cos \nu x + C_3 e^{\mu x} \sin \nu x - \frac{1}{\beta_1}, \quad (5)$$

где k_1 — действительный корень; $k_2 = \mu - \nu i$; $k_3 = \mu + \nu i$;

Постоянные интегрирования определяются из граничных условий

$$\Theta_r|_{x=0} = 0 \quad \text{и} \quad \left. \frac{d\Theta_{cr}}{dx} \right|_{x=0} = 0;$$

а) в случае действительных корней характеристического уравнения—

$$C_1 = \frac{1}{\beta_1} \frac{A_{23}}{A_{12} + A_{23} + A_{31}}; \quad C_2 = \frac{1}{\beta_1} \frac{A_{13}}{A_{12} + A_{23} + A_{13}};$$

$$C_3 = \frac{1}{\beta_1} \frac{A_{12}}{A_{12} + A_{23} + A_{13}},$$

где

$$A_{12} = k_1 k_2 \left(1 + \frac{k_1}{a_1}\right) \left(1 + \frac{k_2}{a_1}\right) (e^{k_2 L} + e^{k_1 L});$$

$$A_{23} = k_2 k_3 \left(1 + \frac{k_2}{a_1}\right) \left(1 + \frac{k_3}{a_1}\right) (e^{k_3 L} - e^{k_2 L});$$

$$A_{31} = k_3 k_1 \left(1 + \frac{k_3}{a_1}\right) \left(1 + \frac{k_1}{a_1}\right) (e^{k_1 L} - e^{k_3 L});$$

б) в случае двухкомплексных корней характеристического уравнения—

$$C_1 = \Phi(BN - DM); \quad C_2 = \Phi(DC - AN); \quad C_3 = \Phi(AM - BG),$$

где

$$\Phi = [\beta_1 (BN + DG + MD - AN)]^{-1}; \quad A = k_1 + \frac{k_2^2}{a_1}; \quad B = \frac{\mu^2}{a_1} - \frac{\nu^2}{a_1} + \mu;$$

$$D = \frac{2\mu\nu}{a_1} + \nu; \quad G = k_1 e^{k_1 L} + \frac{k_1^2}{a_1} e^{k_1 L};$$

$$M = e^{\mu L} (B \cos \nu L - D \sin \nu L); \quad N = e^{\mu L} (B \sin \nu L + D \cos \nu L).$$

Имея Θ_r изменение температуры газа по каналу трубки определяется:

$$\Theta_{cr} = \Theta_r + \frac{1}{a_1} \cdot \frac{d\Theta_r}{dx},$$

при этом для коэффициента теплоотдачи в газ используется формула:

$$\alpha = \frac{\lambda_r}{d} a (\text{Re})^n \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_{\text{вст}}} \right)^m,$$

где d — внутренний диаметр трубки; $\lambda_r, \lambda_{вст}$ — коэффициенты теплопроводности газа и шнека.

Для получения зависимости выходного напряжения разбаланса от измеряемого расхода газа следует задаваться значениями I_n и α_0 из [5] и методом подбора добиваться выполнения равенства [6]:

$$E_0 = \frac{\Delta U R_{01} (R_{\theta_{ср1}} + R_{\theta_{ср2}} + R_1 + R_2) + (R_{\theta_{ср1}} + R_{\theta_{ср2}})(R_1 + R_2)}{R_{\theta_{ср1}} R_1 + R_{\theta_{ср2}} R_2},$$

где E_0 — напряжение питания моста; R_{01} — внутреннее сопротивление источника питания; R_1, R_2 — сопротивление плеч моста; $R_{\theta_{ср1}}, R_{\theta_{ср2}}$ — усредненные значения сопротивлений полуобмоток термоприемника при определенных значениях расхода измеряемого газа; ΔU — напряжение разбаланса электроизмерительного моста.

По изложенной методике проделана экспериментальная проверка для некоторых значений расходов воздуха, аргона и кислорода. Сравнение экспериментальных данных с результатами проведенных вычислений показало, что погрешность измерений не превосходит 2,5%. Разработанные расходомеры ДРГ-300 прошли заводские испытания и внедрены на предприятиях МЭП.

14. VI. 1985.

Ս. Գ. ՄՐԱՊՅԱՆ, Ս. Մ. ԳՈՐԳՍՅԱՆ, Հ. Ս. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

ՀԱՄԱՏԵՂՎԱԾ ՏԱՔԱՅՈՒՅԻՉՈՎ ԵՎ ՋԵՐՄԸՆԳՈՒՆԻՉՈՎ ՉԶՊՎՈՂ
ԿԱՆՈՐԻՄԵՏՐԱԿԱՆ ԾԱԽՍԱՀԱՓԻՆԻ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Ա մ փ ո փ ո ռ ի մ

Ուսումնասիրվել է համատեղված տաքացուցիչով և ջերմընդունիչով լքահալոց կալորիմետրական ծախսաչափիչը նկարագրող ջերմային բալանսի հավասարումը, որում հաշվի են առնված ջերմափոխանակման պրոցեսը բնութագրող բոլոր բաղադրիչները: Որոշակի գազի համար ուղղակի չափումների միջոցով որոշվել են ստիպողական ջերմափոխանակման չափանիշի բանաձևում մասնակցող հաստատունների արժեքները, որոնք բնորոշում են տվյալ ծախսաչափիչը: Օգտագործելով տվյալ ծախսաչափը բնութագրող հաստատունների արժեքները՝ տարբեր գազերի համար համեմատվել են փորձնական և տեսական եղանակով ստացված ջերմաստիճանի բաշխման կորերը: Կատարված հաշվարկների և փորձի արդյունքների համեմատումը ցույց է տվել նրանց բավարար համընկնումը:

ЛИТЕРАТУРА

1. Агайкин Д. И. Магнитные газованализаторы. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963.—216 с.
2. Коротков П. А., Беляев Д. В., Азимов Р. К. Тепловые расходомеры.—Л.: Машиностроение, 1969.—176 с.
3. Термоанемометрический датчик малых расходов газа с металлическим терморезисторным преобразователем / С. Д. Сранян, М. Г. Петросян, А. Р. Казаров и др.—Ереван, 1975.—4 с.—Рукопись представлена НИИТМ. Дел. в ВИМИ 22 июля 1975, № ВМДО 1787.
4. Филиппов И. Ф. Вопросы охлаждения электрических машин.—М.—Л.: Энергия, 1964.—331 с.
5. Исанинко В. П., Осипова В. А., Сукодел А. С. Теплопередача.—М.: Энергия, 1975.—488 с.
6. Нечаев Г. К. Реле и датчики с полупроводниковыми термосопротивлениями.—М.—Л.: Госэнергоиздат, 1961.—111 с.